

Avril 1966

LRP 24/66

LABORATOIRE DE RECHERCHES SUR LA PHYSIQUE DES PLASMAS
FINANCÉ PAR LE FONDS NATIONAL SUISSE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ETUDE DE LA PRECISION DES MESURES
EN SPECTROSCOPIE PHOTOGRAPHIQUE

J. Durand

LAUSANNE

Avril 1966

LRP 24/66

ETUDE DE LA PRECISION DES MESURES
EN SPECTROSCOPIE PHOTOGRAPHIQUE

J. Durand

Abstract :

Light intensity measurements using photographic plates can give large errors when the development is carried out according to the instructions of the manufacturer (Eberhard's effect). This work determines experimental conditions under which good results can be obtained. It appears that the photographic method can give results with an average accuracy of 10 %.

Introduction.

Lors de la mesure de probabilités de transitions de O III et de N III avec un arc de courte durée décrit en (1), il est apparu que le rapport d'énergie des raies émises pouvait varier considérablement (de plus d'un facteur 2) du rapport théorique attendu.

La mesure se faisait sur plaque photographique Ilford HPS développée 9 min. dans un bain de révélateur Ilford ID2 à 20,2°C, soit des conditions normales recommandées par le fabricant. La courbe de noircissement était obtenue avec une série de 7 décharges de même durée que la décharge de mesure, la variation de l'intensité de décharge à décharge étant donnée par des filtres gris étalonnés (Balzers) placés devant la fente du spectrographe. L'étalonnage se faisait à la longueur d'onde 4471 Å (He I, $2^3\text{P}-4^3\text{D}$) avec une fente de spectrographe largement ouverte. Une photocellule placée avant le filtre gris contrôlait la reproductibilité des décharges. Le spectrographe Jarrel-Ash de 75 cm de distance focale avait une dispersion de 10 Å/mm avec un réseau de 1200 traits/mm.

Les mesures ont montré que des raies étroites d'intensités connues donnaient toujours des rapports d'énergies trop élevés par rapport à ceux mesurés avec la courbe d'étalonnage et qu'il fallait considérer que la courbe d'étalonnage éclaircissement-noircissement était différente selon la largeur de l'image impressionnée.

Cet effet est décrit dans la littérature sous le nom d'effet de bord ou encore d'effet Eberhard 2) 3). Il était toutefois nécessaire de trouver des conditions expérimentales telles qu'il soit supprimé pour pouvoir faire des mesures quantitatives de valeurs f avec des plaques photographiques. Nous avons monté une expérience dans ce but et nous avons pu montrer que d'autres conditions de développement permettent d'obtenir des mesures justes à $\pm 10\%$, ce qui est suffisant pour la précision envisagée.

Ce travail n'a pour but que de chercher des conditions de travail acceptables avec les plaques choisies (Ilford H.P.S.) et non d'expliquer les phénomènes en présence. Ces phénomènes sont en effet encore mal connus aujourd'hui et les théories qui s'y rapportent souvent contradictoires 3) 4).

Description de l'appareil

Le montage optique utilisé est schématisé par la fig. No 1. Les surfaces éclairées de la plaque photographique sont données par l'image à l'échelle 1/2 des ouvertures de la plaque A. L'ouverture carrée a un côté de 10 mm, les bords de l'ouverture étant constitués par des chanfreins dans l'aluminium. Les lèvres des fentes sont matérialisées par des lames de rasoir collées sur la plaque. Les largeurs des 3 fentes sont respectivement 0,02 mm, 0,5 mm et 0,05 mm.

L'image de la plaque A sur la plaque photographique est donnée par la lentille B, achromate de 300 mm de distance focale et de 50 mm d'ouverture. Le réglage de la meilleure mise au point se fait pour la fente fine placée sur l'axe optique.

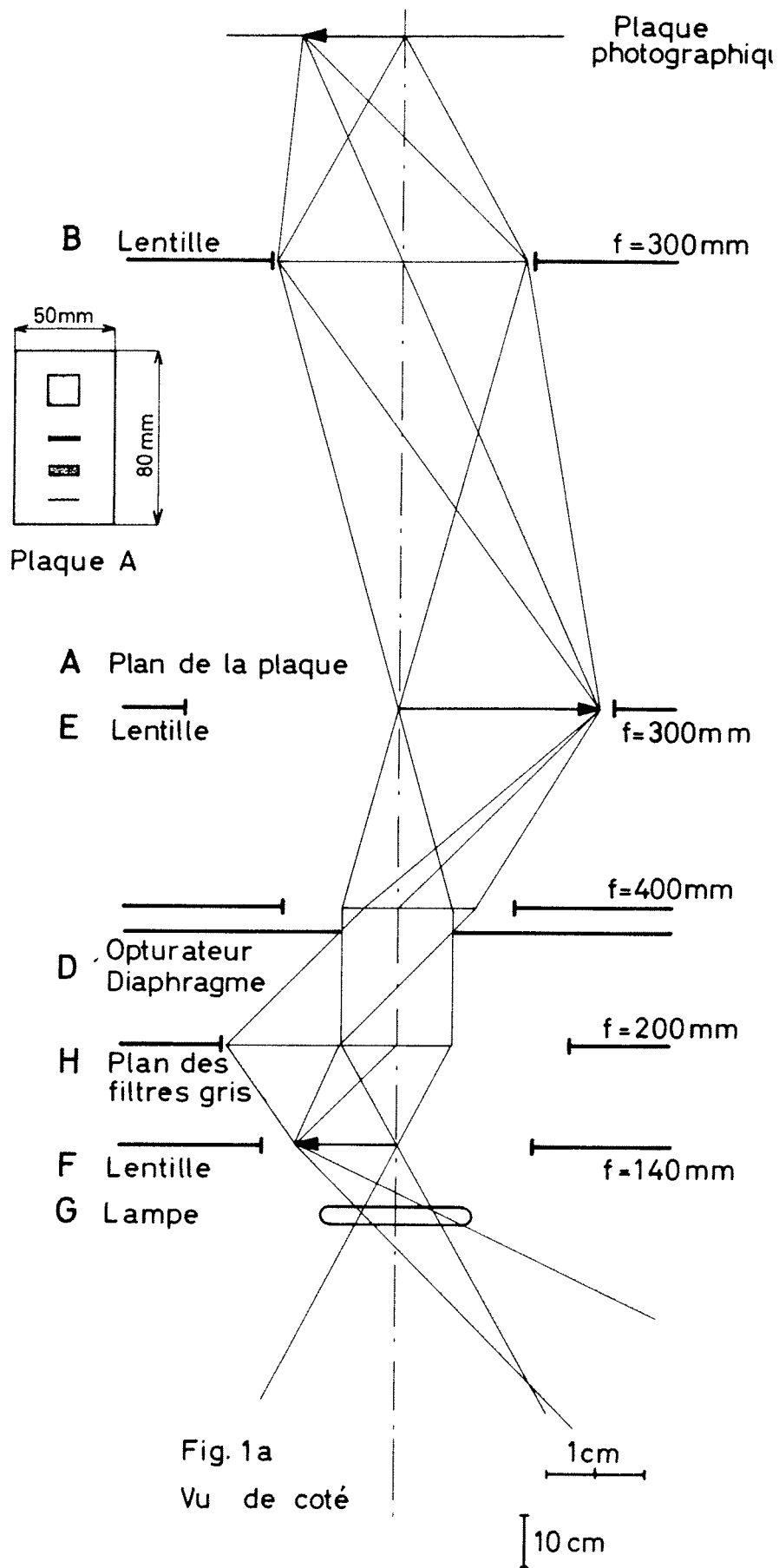
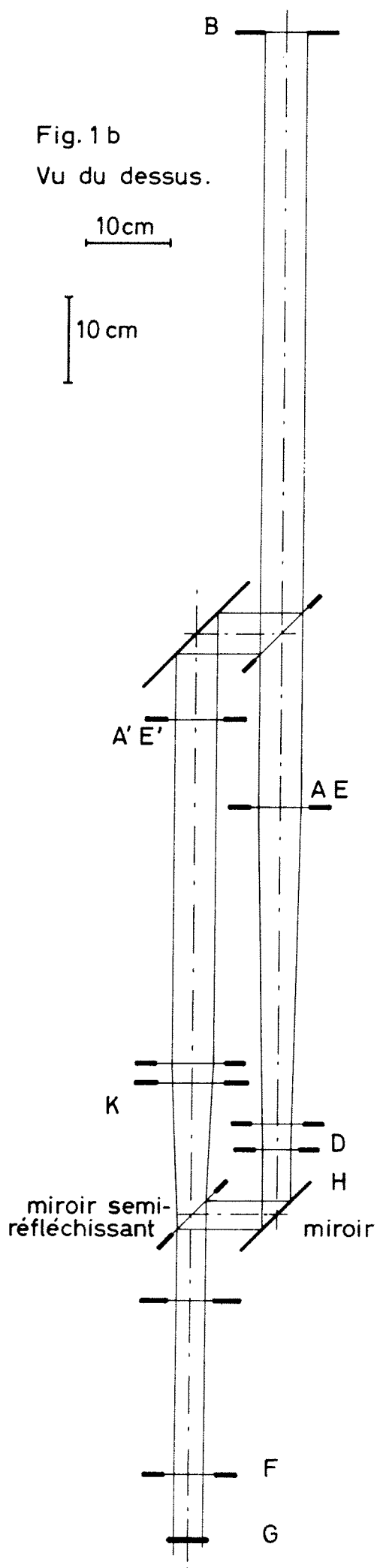
L'éclairage uniforme de la plaque A est obtenue en formant l'image de la lampe sur la lentille B et en conjugant la plaque A avec la lentille **F**. Le diaphragme effectif se trouve en D.

Deux sortes de sources lumineuses ont été utilisées : 1) Une lampe pour décharge rapide montée selon le schéma de la fig. 2. L'impulsion lumineuse a alors une durée de 0,1 ms. 2) Une lampe à mercure à enveloppe de quartz de 400 W. Le temps de pose est donné par un obturateur mécanique placé en D. Dans les 2 cas un filtre d'interférence de 70 Å de bande passante isole la région de 4050 Å qui est seule utilisée pour les mesures.

Le montage de la fig. 1b montre encore le 2ème chemin optique qui permet d'exposer la plaque avec un fond continu en plus de l'image des fentes étroites (voir fig. 3). Il est ainsi possible de contrôler la justesse des mesures faites en présence d'un rayonnement continu du plasma additionné aux raies à mesurer.

Fig. 1 b

Vu du dessus.



La quantité de lumière arrivant sur la plaque photographique pour former une image est déterminée par la transmission de filtres gris étalonnés de la maison Balzers (fig. 3). Ces filtres placés en H (fig. 1) atténuent l'image des ouvertures de la plaque A alors que les filtres placés en K règlent l'intensité de la lumière du fond continu.

Les lentilles de champ E et F sont placées aux foyers images du système optique. Elles conjugent les plans B, D, G. Les lentilles placées en B, ~~P~~ et **D** sont ainsi toujours éclairées en leur centre.

Le développement se fait dans une cuve basculante (voir Annexe 1). La fréquence du mouvement est de 0,5 Hz et son amplitude de 6° . Le révélateur est préparé immédiatement avant l'utilisation, à partir d'une solution mère, et ceci en quantité suffisante pour assurer un mouvement uniforme du liquide dans la cuve de développement. La température est réglée avec un thermostat (voir Annexe 1) qui maintient une plaque d'aluminium placée sous la cuve de développement à la température désirée. Il est ainsi possible d'avoir un bain stable à $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Les températures inférieures à la température ambiante sont obtenues en refroidissant les parois de la boîte de développement par une circulation d'eau à 8°C .

Le fixage est toujours fait en bain acide et le séchage des plaques à l'air libre.

Les mesures de noircissement des plaques ont été exécutées sur un photomètre Zeiss GII. Avant chaque mesure il a été contrôlé que la largeur de la fente était assez faible pour ne pas provoquer d'erreur de lecture.

Un système photoélectrique placé derrière une fente de précision permet de mesurer la quantité de lumière reçue dans l'image géométrique des orifices de la plaque A. Le montage garanti que le plan ^(de l'image) de la fente et celui de la plaque sont distants de moins de $1/10$ de mm ce qui est suffisant pour l'ouverture du système optique de $1/20$. Le système de lecture photoélectrique est assez sensible pour mesurer le profil dans les ailes de l'image de la fente

jusqu'à une énergie correspondant à 1/100 de l'énergie au centre (avec une fente oscillatrice d'une largeur inférieure au dixième de la largeur à 1/2 hauteur de l'image la plus petite).

Mesures.

Dans une première série de mesures, nous avons comparé le noircissement de l'image du carré avec celui de l'image de la fente très fine adjacente (fig. 3). Le fond continu est ici toujours nul, le miroir semi-réfléchissant placé entre la plaque A et la lentille B étant même supprimé pour éviter une image parasite.

La mesure de ces 2 images avec le système photoélectrique montre que l'éclairement au maximum de l'image de la fente est le même que celui de l'image du carré. Le profil de l'image de la fente correspond également à l'image géométrique et pourra être comparé au profil mesuré avec des plaques photographiques. Les aberrations géométriques de l'optique ne jouent donc pas de rôle, la diffraction étant de toute façon négligeable.

Les résultats des mesures sont rassemblés dans les fig. 4 à 9. Chaque figure correspondant à une autre condition de développement. L'énergie lumineuse est fournie pour la source No 2 avec un temps de pose de 0,1 s.

L'axe des abscisse correspond toujours à l'énergie E transmise par le filtre H. L'axe des ordonnées donne le noircissement mesuré sur le photomètre :

$$N = \log \frac{U_0}{U}$$

U_0 : lumière du photomètre transmise à travers la zone de référence de la plaque photo.

U : lumière du photomètre transmise à travers la zone à mesurer de la plaque.

Les courbes α donnent le noircissement au centre des images du trou carré, les courbes β le noircissement maximum au centre de l'image de la fente fine. Chaque courbe correspond à la mesure de plus de

Fig.2 Décharge rapide

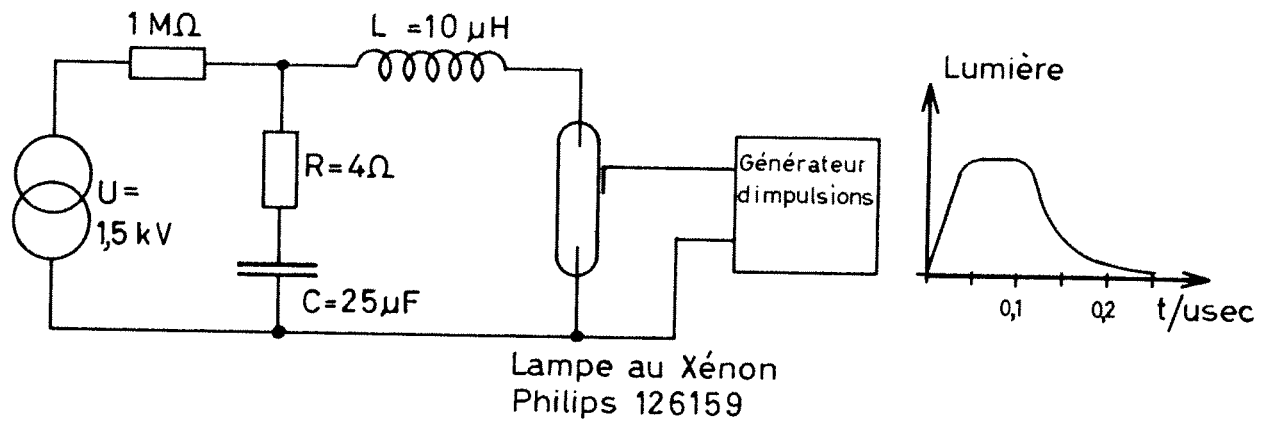
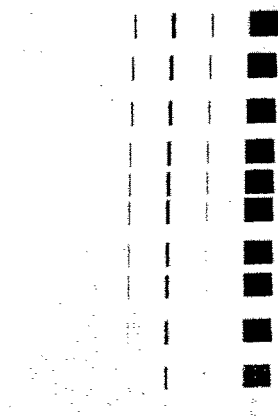


Fig 3 Image d'une plaque



8 noircissements. Les mesures ont été répétées, la dispersion reste toujours plus petite que $N = 0,05$.

La première constatation est que les noircissements β de l'image de la fente sont toujours plus grands, à éclairement égal, que ceux α de l'image du carré (effet Eberhard). Ceci est dû à la diffusion du révélateur dans la plaque photographique. L'explication du phénomène est fort simple : une zone de la plaque fortement impressionnée consomme pratiquement tout le révélateur qui pénètre dans la gélatine, au contraire une zone peu impressionnée se remplit de révélateur neuf. A la limite entre 2 zones il se produira une diffusion entre révélateur neuf et usé qui renforce le noircissement du bord de la zone impressionnée.

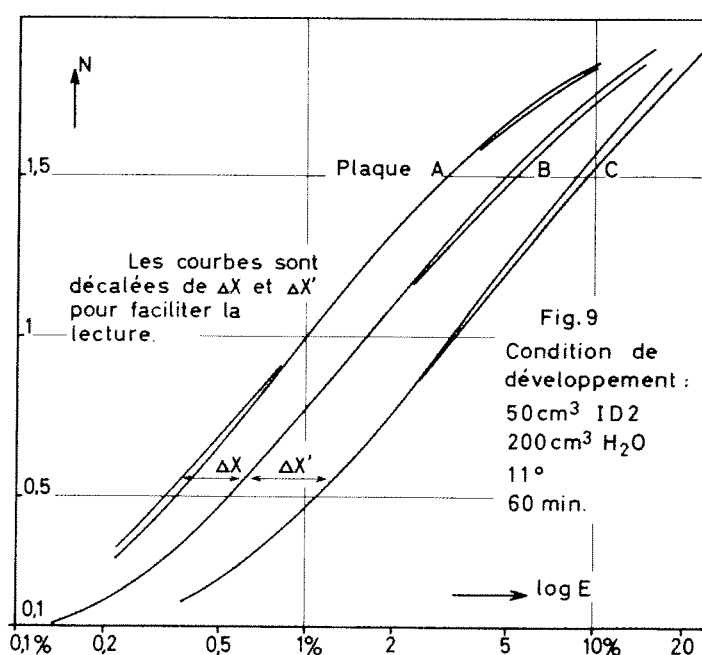
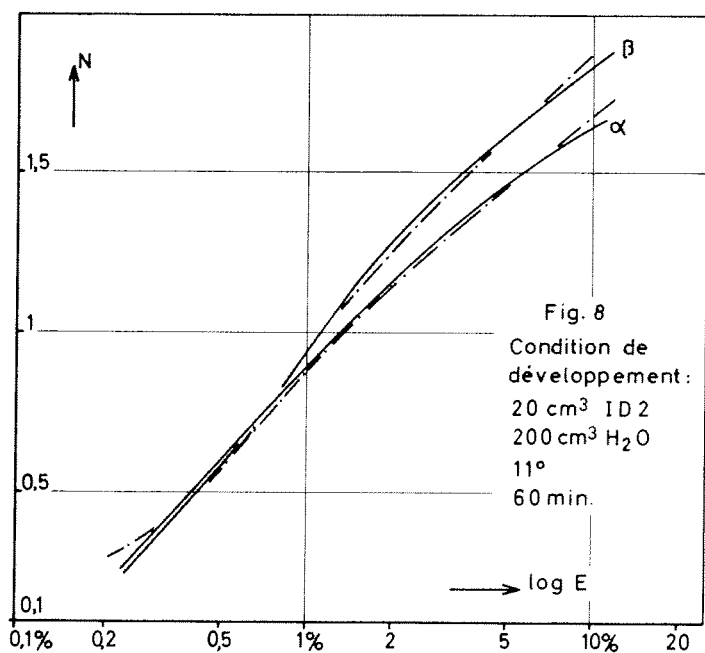
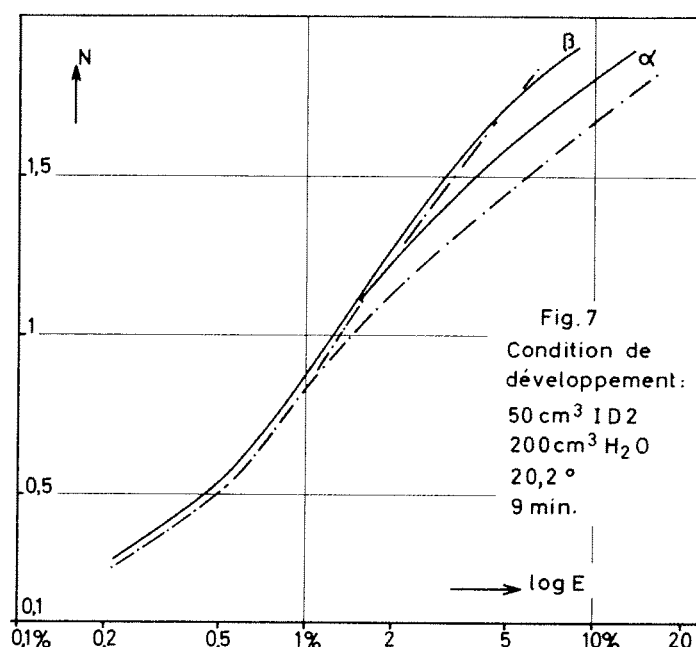
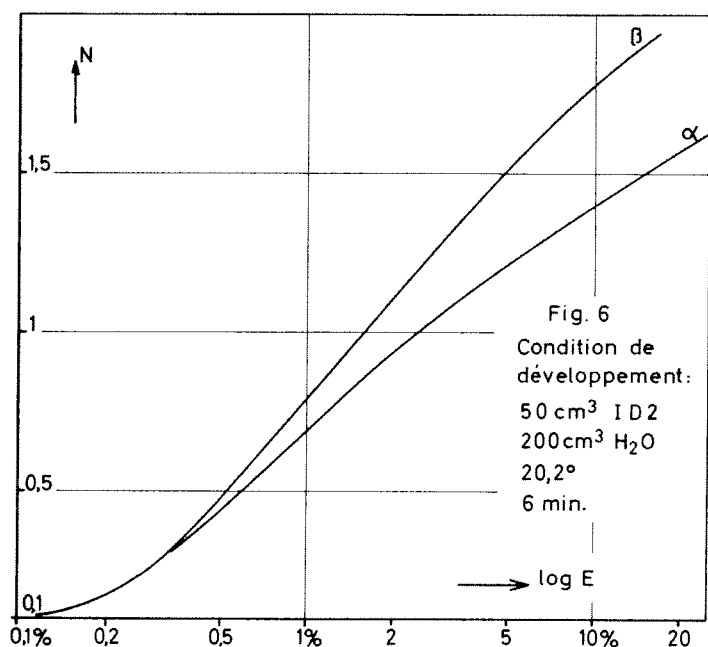
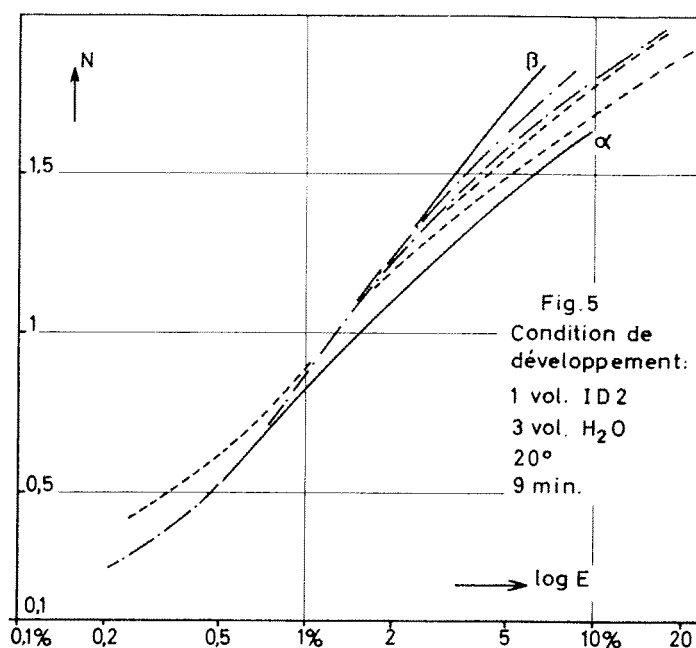
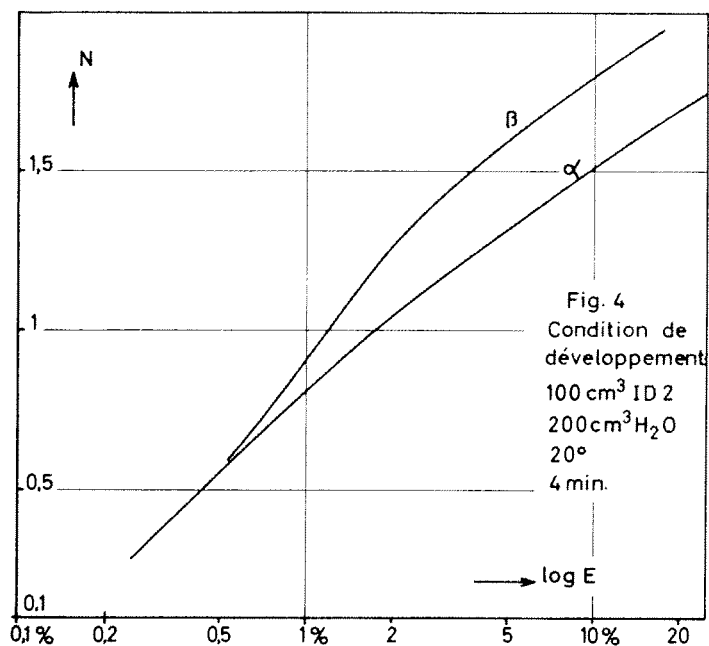
Il est particulièrement remarquable de voir que l'effet de bord diminue lorsque, toutes choses égales d'ailleurs, la durée du développement augmente (voir fig. 6 et fig. 7). En d'autres termes, il faut révéler tous les grains d'argent impressionnés pour minimiser l'effet Eberhard. Ce fait est fort regrettable car les plaques ont ainsi un fort γ .

$$\gamma = \frac{\Delta N}{\Delta(\log E)}$$

et il devient difficile de mesurer simultanément des raies d'intensités très différentes. Cette constatation est en contradiction avec les conseils de Unsöld (3) qui recommande de développer faiblement dans ce cas.

Un développement à basse température montre le même phénomène. (fig. 8 et 9). La concentration du révélateur pour le développement des 2 plaques de la figure 8 est trop faible et les 2 courbes de noircissement s'écartent de manière intolérable. Une concentration de révélateur 2,5 fois plus élevée (fig. 9) donne par contre des résultats qui permettent des mesures. Ce seront ces conditions qui seront utilisées par la suite.

La précision des mesures avec les conditions de développement de la fig. 9 a été testée en mesurant le profil de l'éclairement dans



les images de la fente étroite avec, comme référence, la courbe de noircissement donnée par les images du carré.

Le tableau No 1 donne l'énergie totale (produit de l'éclairement par la surface) des différentes images des 2 plaques A et C (fig.9) en unités arbitraires. Les noircissements des images sur la plaque C sont plus faibles que ceux de la plaque A. Ceci est dû à un déplacement de la plaque dans le châssis. Les mesures d'énergie totale n'en sont pas affectées, car les images de la fente sont alors plus larges.

Tableau No 1

| Plaque | Filtre H | Energie totale | Energie relative | Noircissement maximum |
|-----------|-------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| C | 26,5 % | 1840 | 1(référence) | 1.65 |
| | 10 % | 567 | 0,82 | 1.18 |
| | 2,8 % | 152 | 0,78 | 0.56 |
| | 1,06 % | 76 | 1.03 | 0.26 |
| A | 10 % | 755 | 0.99 | 1.80 |
| | 1.75 % | 111 | 0.82 | 1.14 |
| moyenne : | | | 0.91 \pm 0,12 | |

L'écart maximum de mesure est de 13 % par rapport à la valeur moyenne lorsque l'énergie totale varie dans un rapport de 1 à 26,5. Il est possible d'améliorer encore cette précision en considérant le noircissement maximum des images. Les raies dont le noircissement maximum dépasse $N = 1,5$ donnant un résultat trop grand, ce qui est conforme à l'explication de l'effet de bord. Il est facile d'en tenir compte et de faire une correction qui assure une précision meilleure que 10 %. (L'image la plus faible mesurée sur la plaque C échappe à cette correction. La détermination de son énergie est de toute façon moins précise que pour les autres images.)

Le tableau 2 donne encore l'élargissement de l'image de la raie dans la plaque photographique. Les mesures photoélectriques de référence ont été faites ici avec une largeur de fente de 2 microns. Les largeurs de raies ont été mesurées sur les profils à 20 %, 40 %, 60 % et 80 % de leur hauteur maximum. Cette manière de faire doit donner une bonne idée de l'information contenue dans les 10 à 12 points de mesure dont on dispose pour tracer les profils.

Tableau No 2

(largeurs d'images en 1/100 de mm)

| | Mesures photoélectriques | | Mesures photographiques | |
|--------------------|--------------------------|------|-------------------------|--------|
| Filtre | | | 10 % | 1,75 % |
| Largeur à 80 % | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,6 |
| 60 % | 2,3 | 2,2 | 2,0 | 2,6 |
| 40 % | 2,9 | 2,9 | 3,0 | 3,6 |
| 20 % | 4,2 | 4 | 4,7 | 5,0 |
| Somme des largeurs | 10,8 | 10,4 | 11,1 | 12,8 |

La différence moyenne de largeur entre la photographie et la mesure photoélectrique est de 3,4 μ m. Cette différence est négligeable dans notre cas. Il n'est pas possible de dire (avec le matériel expérimental dont nous disposons) si elle est due à un élargissement réel de l'image photographique ou si elle correspond simplement à un décalage de 7/100 de mm entre les plans dans lesquels ont été faites les mesures photoélectriques et photographiques.

Il est un fait curieux à remarquer : l'image obtenue avec le filtre 1,75 % est un peu plus large que celle obtenue avec celui de 10 %. Or (voir tableau No 1) ce sont justement les images peu intenses

qui donnent des énergies trop faibles par rapport aux images intenses. Il y a donc une certaine compensation lors de la mesure de la quantité de lumière qui est le produit de l'intensité lumineuse par la surface éclairée.

Dans une 2ème série de mesures nous avons contrôlé que les plaques photographiques donnent également de bons résultats lorsque :

1. la durée de l'exposition lumineuse passe de 0,1 s à 0,1 ms.
2. la lumière d'un fond continu s'additionne à celle des raies à mesurer.

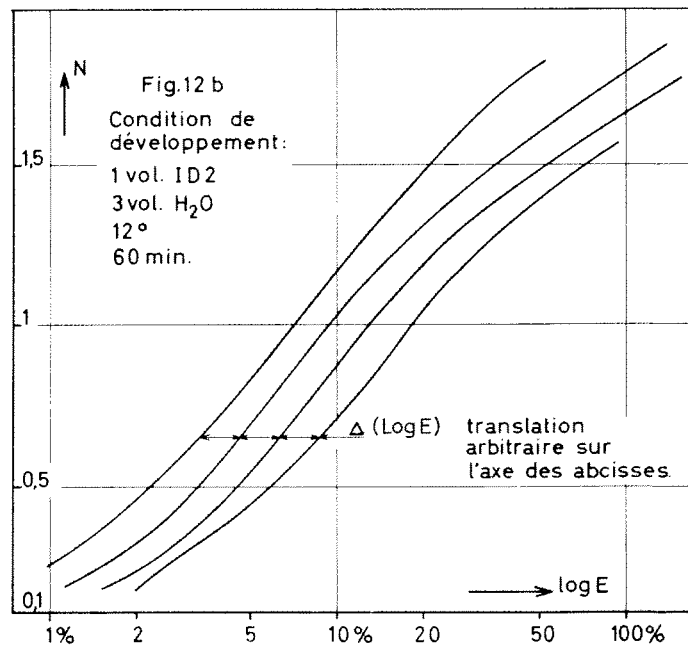
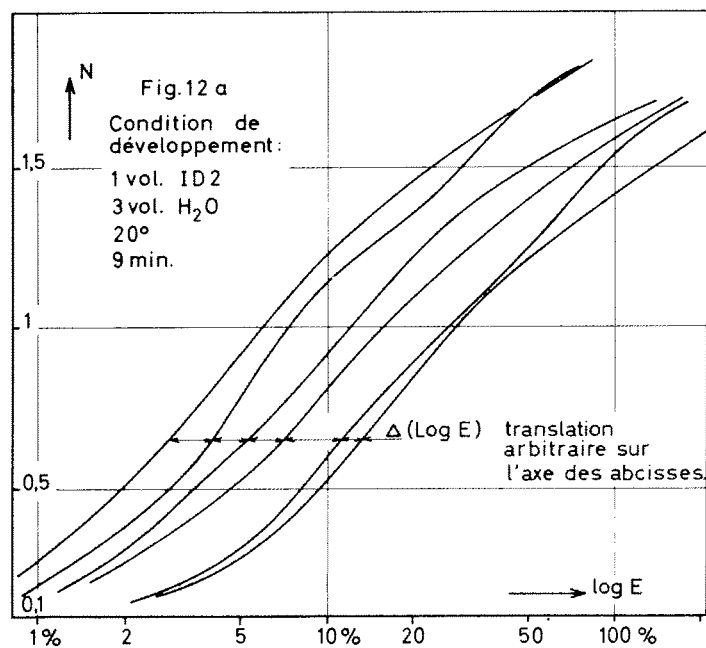
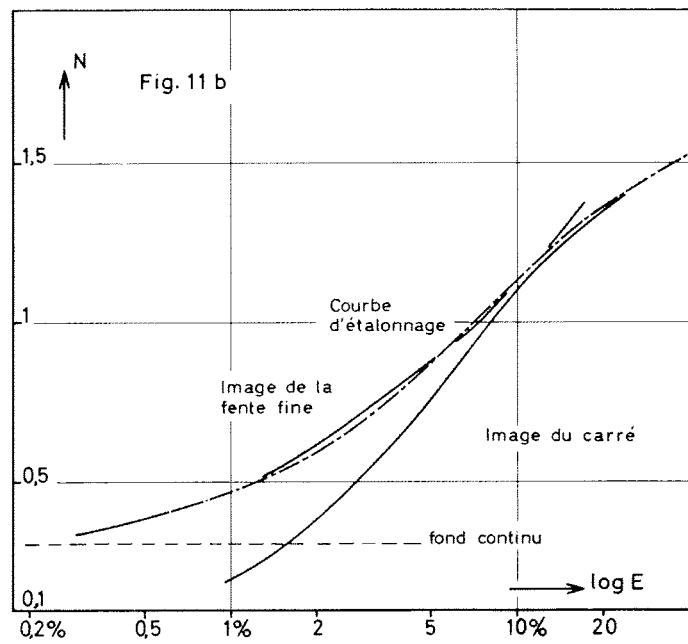
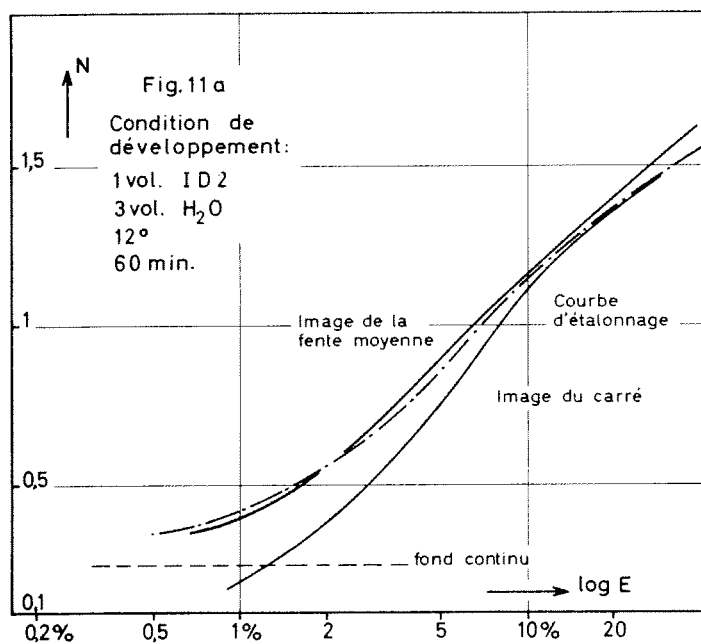
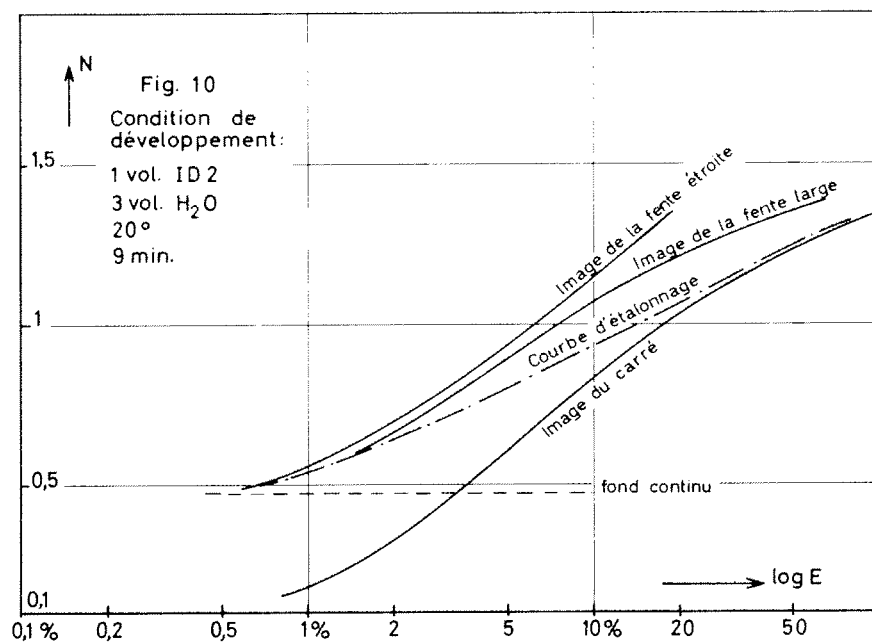
La fig. 10 donne les courbes de noircissement obtenues avec une plaque développée "normalement" (9 min. dans le révélateur ID2 à 20°C avec une dilution de 1 à 3)*.

La courbe d'étalonnage pour les raies avec fond continu s'obtient à partir de la courbe de noircissement pour le carré (sans fond continu). A chaque noircissement correspond pour la raie un éclaircissement égal à l'éclaircissement du carré diminué de celui du fond continu.

Comme précédemment, la courbe d'étalonnage ne coïncide pas avec les valeurs mesurées (Effet Eberhard), par contre les conditions de développement favorables dans la 1ère série de mesures donnent ici également de bons résultats (voir fig. 11).

Nous avons fait des mesures sur dix courbes de noircissement avec des fonds continus dont l'éclaircissement était compris entre 1,5 et 6 % de l'éclaircissement maximum de l'image des fentes. Les noircissements des images des fentes correspondent aux valeurs déterminées

* Les diverses courbes de noircissement ont été translatées le long de l'axe des ($\log E$). Cette manipulation a été rendue nécessaire par une mise au point défectueuse de l'image des fentes. Les résultats n'en sont pas affectés car l'effet Eberhard à supprimer se manifeste pour une variation de la pente des courbes de noircissement.



avec la courbe d'étalonnage avec une erreur moyenne de 10 % environ. Ce chiffre est bien le même que celui trouvé dans la première série de mesures, nous sommes donc assurés que les mesures faites dans les conditions de notre expérience ne présenteront plus d'erreurs systématiques.

Dans la fig. 12 nous tenons encore à montrer la dispersion des courbes de noircissement d'une plaque à l'autre. Les conditions de développement étant aussi semblables que possible. Cette figure montre qu'il est indispensable de déterminer la courbe de noircissement pour chaque plaque si l'on désire obtenir la précision moyenne de 10 % trouvée plus haut.

Des essais qualitatifs ont été faits pour d'autres plaques photographiques (Kodak II-0, 103-0) et d'autres révélateurs (D 19b de Kodak, Rodinal Agfa). Les résultats sont identiques : plus le développement d'une émulsion photographique est poussé, plus l'effet Eberhard diminue. La condition de mesure optimum sera donc un compromis entre la diminution de l'effet Eberhard et l'augmentation de l'opacité des parties non exposées de la plaque photographique.

Références.

- 1) J. Durand : Etude des probabilités de transition de quelques éléments ionisés : construction de l'expérience; LRP 16-65
- 2) A. Unsöld : Physik der Sternatmosphären - Springer 1955
- 3) C.E. Kenneth Mees : The Theory of Photographic Process; Macmillan Co.
- 4) J.W. Mitchell : Die photographische Empfindlichkeit; Darmstadt 1957.

ANNEXE 1

Construction de la boîte de développement.

Les conditions de développement se sont révélées avoir une très grande influence sur les courbes de noircissement obtenues. C'est pourquoi, nous pensons utile de donner ici les principales caractéristiques de la boîte de développement et de la stabilisation de température.

Fig.13 Boîte de développement.

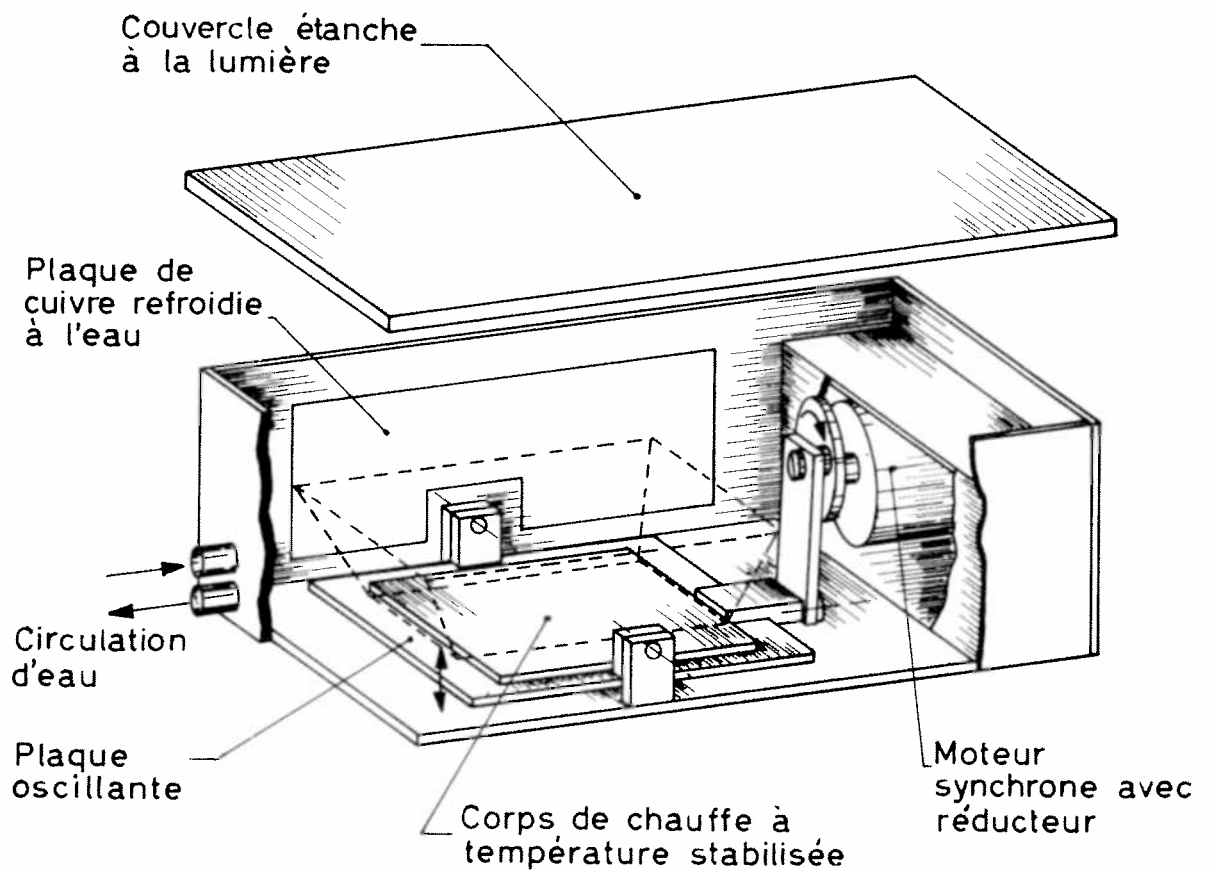


Fig. 14 Schéma du régulateur de température
Température ajustable entre 22° et 9°C

